ارزیابی تجربی و تعیین همبستگی مقاومت‌های فشاری و برشی در بتن الیافی پلیمری

مهدی فرامرزی[۱]، محسن موسیوند*[۲]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی،گنبد کاووس، ایران، mahdi.faramarzi7179@iau.ir
۲- گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی،گنبد کاووس، ایران، mousivand@iau.ir

خلاصه

این پژوهش به بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان، الیاف پلی‌پروپیلن (PP)، رزین پلیمری و ترکیب همزمان آن‌ها بر خواص بتن تازه و سخت‌شده پرداخته است. در این راستا، طرح‌های اختلاط مختلفی با نسبت‌های گوناگون آب به سیمان طراحی و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش نسبت آب به سیمان، روانی بتن را افزایش داده، اما منجر به کاهش مقاومت‌های مکانیکی آن می‌شود. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش روانی بتن تازه شد، ولی نقش مؤثری در بهبود مقاومت فشاری و برشی ایفا کرد. در مقابل، استفاده از رزین پلیمری باعث افزایش کارایی و روانی شد، اما کاهش قابل‌توجهی در مقاومت‌های فشاری و برشی بتن ایجاد نمود. بررسی رفتار ترکیبی این دو افزودنی نشان داد که استفاده همزمان از آن‌ها می‌تواند اثرات منفی هر یک را تا حدی تعدیل کرده و به تعادل مناسبی میان کارایی و مقاومت منجر شود. همچنین روابط مشخصی میان مقاومت فشاری و برشی به‌دست آمد که روند تجربی آزمون‌ها را با دقت بالایی تأیید می‌کرد. نتایج کلی تحقیق نشان می‌دهد که طراحی بهینه و هدفمند ترکیب افزودنی‌ها می‌تواند موجب بهبود هم‌زمان خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن گردد و مسیر توسعه بتن‌های توانمند را هموار سازد.

کلمات کلیدی: بتن، الیاف پلی‌پروپیلن، پلیمر رزین اکریلیک، اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت برشی.

۱. مقدمه

بتن، به‌عنوان پرکاربردترین مصالح در صنعت ساخت‌وساز، با وجود مقاومت فشاری بالا و دوام قابل‌قبول، دارای ضعف ذاتی در مقاومت کششی و رفتار شکننده است [۱, ۲]. این محدودیت‌ها منجر به بروز ترک‌خوردگی و کاهش دوام سازه‌ها در طول زمان می‌شود [۳]. برای غلبه بر این چالش‌ها و ارتقاء عملکرد بتن، رویکردهای نوینی از جمله استفاده از مواد افزودنی نظیر الیاف و پلیمرها توسعه یافته‌اند [۴, ۵]. الیاف پلی‌پروپیلن (pp) در ماتریس بتن، رویکردی مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی آن محسوب می‌شود [۶]. الیاف PP با محدودسازی گسترش ترک‌ها، افزایش مقاومت کششی، خمشی و برشی، و ارتقاء چقرمگی بتن، نقش حیاتی ایفا می‌کنند [۷]. ویژگی‌های منحصربه‌فرد این الیاف نظیر وزن سبک، مقاومت شیمیایی بالا، مقاومت در برابر سایش و صرفه اقتصادی، آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل در صنعت بتن تبدیل کرده است [۸, ۹]. این الیاف به‌ویژه در کنترل ترک‌های پلاستیک ناشی از انقباض در مراحل اولیه گیرش مؤثر بوده و با ایجاد شبکه‌ای مقاوم در داخل خمیر سیمان، از رشد ترک‌ها جلوگیری می‌کنند [۱۰]. همچنین، حضور الیاف PP منجر به افزایش قابل‌ملاحظه در مقاومت کششی و بهبود مقاومت خمشی بتن می‌شود [۱۱]. اگرچه تأثیر مستقیم آن‌ها بر مقاومت فشاری بتن کمتر است، اما این تأثیر همچنان قابل توجه بوده و به عواملی نظیر درصد حجمی، طول و توزیع الیاف در مخلوط بتن وابسته است [۱۲, ۱۳]. تحقیقات نشان داده‌اند که الیاف PP به‌ویژه در بهبود مقاومت برشی و رفتار لایه اینترفیس (سطح مشترک) بتن نتایج مثبتی به همراه دارند [۱۴]. همچنین، استفاده از الیاف در بتن معمولی یا خودتراکم، منجر به بهبود جذب انرژی و ممانعت از گسترش ترک‌های موئینه در مقاطع مختلف می‌شود [۱۵]. پلیمرها به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های بتن، تأثیرات

عمیقی بر ساختار ریزساختاری و در نتیجه بر خواص مکانیکی آن می‌گذارند [۱۶]. رزین‌های پلیمری، به‌ویژه رزین اکریلیک، قادر به کاهش تخلخل، بهبود چسبندگی درون‌دانه‌ای و افزایش دوام بتن هستند [۱۶-۱۸]. رزین اکریلیک با تشکیل لایه‌ای نازک و مقاوم و کاهش نفوذپذیری، نقش مهمی در ارتقاء مقاومت مکانیکی، افزایش دوام و کاهش جذب آب بتن ایفا می‌کند و علاوه بر تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری، موجب افزایش مقاومت خمشی، کششی و انعطاف‌پذیری بتن می‌شوند [۱۷, ۱۸]. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن رزین اکریلیک به بتن، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ و ۱۴ روز) و حفظ این روند افزایشی در سن ۲۸ روز می‌شود [۱۷, ۱۹]. این خاصیت در پروژه‌هایی که نیاز به کسب مقاومت زودهنگام دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است [۵]. با این حال، استفاده از آن‌ها در مقادیر بالا ممکن است باعث کاهش مقاومت فشاری یا برشی شود، که نیاز به تعیین دقیق مقدار بهینه دارد [۱۶, ۱۸]. ترکیب هم‌زمان الیاف و پلیمرها در بتن، که به آن رویکرد هیبریدی نیز گفته می‌شود، از مؤثرترین روش‌ها برای ارتقاء خواص مکانیکی، افزایش چقرمگی شکست، مقاومت برشی و بهبود رفتار ناحیه انتقالی (ITZ) در بتن شناخته می‌شود [۱۸, ۲۰, ۲۱]. در این رویکرد، الیاف پلی‌پروپیلن با ایجاد یک شبکه‌ی درون‌ماتریسی، از رشد و گسترش ترک‌های ریز و ترک‌های ناشی از تنش‌های داخلی جلوگیری می‌کنند، در حالی که پلیمرهایی مانند رزین اکریلیک با بهبود چسبندگی ذرات سیمان و کاهش نفوذپذیری، باعث افزایش مقاومت و دوام بتن می‌گردند [۲۲, ۲۳] تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که افزودن هم‌زمان الیاف PP و رزین‌های پلیمری می‌تواند باعث افزایش مقاومت کششی، خمشی و چقرمگی بتن تا چندین برابر نسبت به حالت فاقد افزودنی شود [۱۳, ۱۷, ۱۹]. این ترکیب هیبریدی با کاهش تخلخل و بهبود پیوند بین اجزا، منجر به افزایش مقاومت فشاری و برشی بتن، به‌ویژه در سنین اولیه، می‌گردد [۷, ۲۰, ۲۱]. به‌علاوه، عملکرد هم‌افزای این مواد در شرایط بارگذاری دینامیکی و ضربه‌ای، رفتار الاستیک و جذب انرژی بتن را بهبود داده و خطر شکست ناگهانی را کاهش می‌دهد [۱۳, ۱۷, ۱۸]. همچنین، مطالعاتی که با هدف بررسی دقیق تأثیر این ترکیب بر لایه ITZ و عملکرد بتن در لایه‌ریزی مرحله‌ای صورت گرفته‌اند، بیانگر بهبود چشمگیر مقاومت برشی مستقیم و کاهش نفوذپذیری در نواحی اتصال بتن‌های جدید و قدیم هستند [۱۷, ۱۸, ۲۳]. نتایج آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهند که استفاده از حدود ۱٪ حجمی الیاف PP به همراه ۳ تا ۵٪ وزنی رزین اکریلیک، می‌تواند مقاومت فشاری بتن را تا ۲۰٪ و مقاومت برشی را تا ۲۵٪ افزایش دهد [۱۳, ۲۴, ۲۵]. با توجه به مزایای چشمگیر ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و رزین اکریلیک، به‌ویژه در بهبود مقاومت‌های مکانیکی و افزایش دوام بتن، بررسی دقیق رفتار این ترکیب در شرایط مختلف ضروری به نظر می‌رسد. یکی از حوزه‌های کمتر مطالعه‌شده، تأثیر این ترکیب بر مقاومت برشی مستقیم بتن است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آزمایشگاهی این اثرات، با رویکردی کمی و تحلیلی طراحی شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهینه‌سازی فرمولاسیون بتن‌های مقاوم و بادوام در پروژه‌های عمرانی کمک نماید.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. مواد و مصالح

در این پژوهش، از مواد مختلفی شامل سیمان، سنگدانه‌ها، الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر بهره گرفته شده است.

۲. ۱. ۱. سیمان

سیمان پرتلند یک ماده هیدرولیکی است که عمدتاً از سیلیکات‌های کلسیم تشکیل شده و در واکنش با آب، محصولاتی نظیر ژل C-S-H تولید می‌کند که موجب سخت شدن و ایجاد مقاومت در بتن می‌شود [۲۶, ۲۷]. این فرآیند که **هیدراسیون** نام دارد، بلافاصله پس از ترکیب سیمان با آب آغاز شده و به تدریج موجب افزایش سفتی و استحکام بتن می‌گردد [۲۸]. در زمان اختلاط، ژل سیمانی مانند چسبی عمل کرده و سنگدانه‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند. سخت شدن بتن تابع عواملی چون ترکیب شیمیایی سیمان، نسبت آب به سیمان، و شرایط محیطی است [۲۹, ۳۰]. کاهش

روانی بتن در ساعات اولیه، نشانه‌ای از پیشرفت هیدراسیون و آغاز گیرش است [۳۱]. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۲ پیوند گلستان استفاده شد. این نوع سیمان به دلیل حرارت زایی کمتر و مقاومت مناسب در برابر حملات متوسط سولفاتی، برای شرایط نیمه‌تهاجمی مانند سازه‌های زهکشی مناسب است [۳۲, ۳۳]. همچنین پیش از استفاده، دمای مصالح از جمله سیمان کنترل شد تا کیفیت اولیه بتن حفظ گردد.



شکل ۱. سیمان مصرفی در تحقیق حاضر و کنترل دمای سیمان جهت انجام طرح اختلاط [۱۸].

به سبب محدودیت فاز آلومینات و کمتر بودن فاز سه کلسیم سیلیکات در این سیمان، که سبب ایجاد خواص ویژه فوق الذکر می‌شود، مقاومت فشار اولیه و نهایی ملات استاندارد آن کمتر از سیمان پرتلند نوع II است. مشخصات فیزیکی این سیمان در جدول ۱ ارائه شده است.

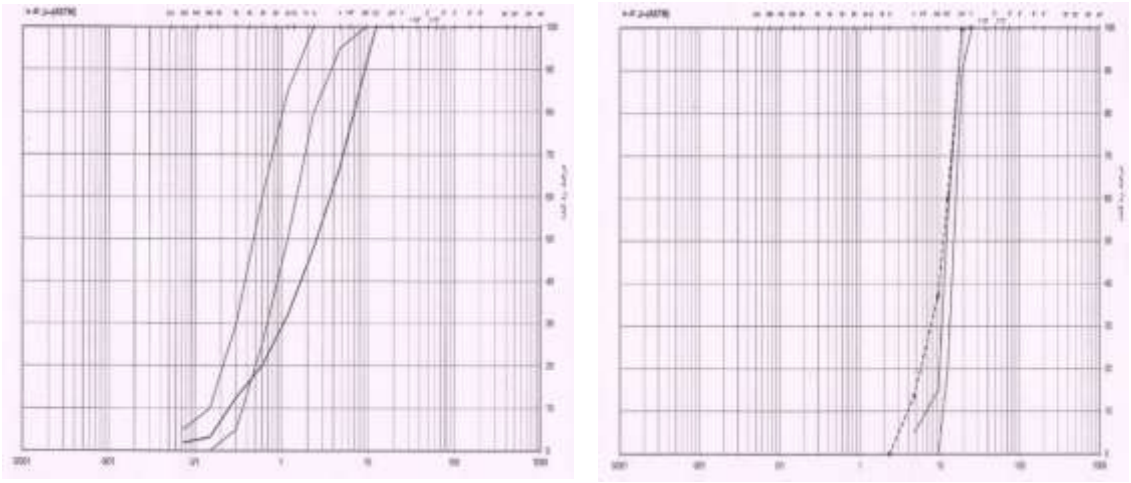
جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند نوع II [۱۸].

پارامترهای شیمیایی	درصد مواد تشکیل دهنده
CaO	۶۳
Sio2	۲۰/۴
Al2O3	۴/۹
Fe2O3	۳/۹
MgO	۱/۷
SO3	۲
NaO2+K2O	۰/۹
Loss on ignition (LOI)	۱/۵
Specific gravity	۳/۱۲
Blaine fineness (m2/kg)	۲۹۵
Average-particle-size (μm)	۲۶

۲. ۱. ۲. سنگدانه‌های طبیعی

سنگدانه‌های مصرفی از کارگاه سنگ‌شکن شنچال گلستان واقع در کیلومتر ۴ جاده آزادشهر–مینودشت تهیه شدند. مصالح از بستر رودخانه‌ای مجاور برداشت و پس از شست‌وشو، سرند و شکستن، سنگدانه‌های درشت با حداکثر اندازه ۲۰

میلی‌متر و سنگدانه‌های ریز (ماسه) با اندازه ۵.۹ میلی‌متر حاصل شد. ماسه مورد استفاده، ترکیبی از مصالح رودخانه‌ای و شکسته با حداکثر اندازه ۴.۷۵ میلی‌متر، وزن مخصوص ظاهری ۲۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب ۱.۵ درصد بود. دانه‌بندی سنگدانه‌ها با تأثیر مستقیم بر فضای خالی و سطح مخصوص، نقش مهمی در طراحی مخلوط بتن دارد و مطابق با استانداردهای ASTM C136، ASTM D422 و ASTM C33 انجام گرفت[۳۴-۳۶]. نمونه‌گیری نیز طبق استاندارد ISIRI 4977 صورت پذیرفت [۳۷]. منحنی دانه‌بندی مصالح در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل۲. منحنی دانه بندی درشت دانه و ریز دانه (به ترتیب از راست به چپ) [۱۸].



شکل۳. (a): سنگدانه‌های درشت (b): سنگدانه‌های ریز [۱۸].

۲. ۱. ۳. الیاف پلی‌پروپیلن

مشخصات فنی الیاف پلی‌پروپیلن (PP) مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۳ ارائه شده و نمونه‌ای از ظاهر فیزیکی آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود. برخلاف الیاف فولادی، الیاف PP نسبت به عوامل محیطی نظیر رطوبت، شرایط قلیایی داخل بتن و تأثیرات جوی مقاوم هستند و دچار خوردگی یا زنگ‌زدگی نمی‌شوند. به همین دلیل، انتظار می‌رود بتن‌های حاوی این نوع الیاف از دوام و پایداری مکانیکی بلندمدت مطلوب‌تری برخوردار باشند [۳۸].

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی [۱۸].

حالت فیزیکی	جامد رشته ای
طول (mm)	۱۲
وزن مخصوص(gr/cm3)	۰/۹۱
رنگ	سفید

نقطه ذوب (درجه سانتیگراد)	۱۶۰
مقاومت کششی (MPa)	۴۴۵
مدول الاستیسیته (Gpa)	۵



شکل۴. الیاف پلی پروپیلن [۱۸].

۲. ۱. ۴. پلیمر

در این پژوهش از چسب بتن SA12 تولید شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است؛ این ماده یکی از افزودنی‌های رایج در بتن‌ریزی محسوب می‌شود که کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های ساختمانی دارد. چسب مذکور نوعی پلیمر امولسیونی مبتنی بر رزین اکریلیک بوده و استفاده از آن موجب بهبود قابل‌توجه خواصی نظیر مقاومت کششی، مقاومت خمشی تا حدود ۵۰ درصد، مقاومت سایشی، چسبندگی و دوام مصالحی چون بتن، گچ و ملات‌های آهکی می‌گردد. همچنین این پلیمر در کاهش ترک‌خوردگی سطحی مؤثر عمل می‌کند. کیفیت و عملکرد این ماده بر اساس استانداردهای ASTM C1059، ASTM C1042 و ASTM C1440 قابل ارزیابی و کنترل است [۳۹-۴۱]. مشخصات فنی این محصول در جدول ۴ و نمای ظاهری آن در شکل ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۴. برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر [۱۸].

حالت فیزیکی	مایع غلیظ
یون کلر	ندارد
وزن مخصوص (gr/cm3)	1.05 ± 0.05
رنگ	شیری رنگ
PH	6.5 ±1



شکل۵. پلیمر مورد استفاده در تحقیق حاضر [۴۲].

۲.۲. طرح‌های اختلاط و آماده‌سازی بتن

برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر مطابق با طرح‌های اختلاط ارائه‌شده در جدول ۵ ساخته شدند. این نمونه‌ها شامل بتن معمولی، بتن مسلح‌شده با الیاف، بتن اصلاح‌شده با پلیمر، و بتن ترکیبی حاوی الیاف و پلیمر بودند. پس از ساخت، نمونه‌ها به مدت ۷ و۱۴و ۲۸ روز در شرایط عمل‌آوری در محیط کاملاً اشباع نگهداری شدند. سپس آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها صورت گرفت تا تأثیر انواع افزودنی‌ها و ترکیبات مورد استفاده بر عملکرد مکانیکی بتن ارزیابی شود.

جدول۵- طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی

ردیف	نام طرح	تاریخ ساخت	عیار سیمان kg/m^3	آب Lit/m^3	نوع الیاف و افزودنی	W/C	مقدار الیاف و افزودنی kg/m^3	شن kg/m^3	ماسه kg/m^3	روانی بتن cm	وزن مخصوص kg/m^3
1	شاهد ۱	1402.01.20	350	140		0.4		510	1406	5	2406
2	شاهد ۲(CS)	1402.01.20	350	175		0.5		510	1315	14	2350
3	شاهد ۳	1402.01.20	350	192.5		0.55		510	1268	20	2320.5
4	pp 0.4%	1402.02.09	350	175	پلی پروپیلن	0.5	1.4	510	1312.8	12	2349.2
5	pp 0.7%	1402.02.09	350	175	پلی پروپیلن	0.5	2.45	510	1310	10	2347.45
6	pp 1%	1402.02.16	350	175	پلی پروپیلن	0.5	3.5	510	1308	8	2346.5
7	pp 1.2%	1402.02.16	350	175	پلی پروپیلن	0.5	4.2	510	1306	4	2345.2
14	Poly 3%	1402.03.10	339.5	175	پلیمر	0.5	10.5	510	1297	16	2332
15	Poly 5%	1402.03.10	332.5	175	پلیمر	0.5	17.5	510	1286	17	2321
16	Poly 7%	1402.03.10	325.5	175	پلیمر	0.5	24.5	510	1274	19	2309
18	0.4%pp+3%poly	1402.03.28	339.5	175	پلی پروپیلن+پلیمر	0.5	1.4-10.5	510	1294	14	2330.4

۳.۲. تست آزمایشگاهی

۱.۳.۲. آزمایش بتن تازه

آزمایش اسلامپ یکی از رایج‌ترین آزمون‌های میدانی برای ارزیابی ویژگی‌های رئولوژیکی بتن تازه، شامل روانی و قوام آن است. این آزمون به‌ویژه در تعیین مقدار آب مورد نیاز در طرح اختلاط بتن، بدون ایجاد جداشدگی در ترکیب، کاربرد دارد. آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C143/C143M انجام شده است. در این روش، بتن تازه در قالب مخروط اسلامپ با ابعاد مشخص ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، قطر پایینی ۲۰۰ میلی‌متر و قطر بالایی ۱۰۰ میلی‌متر در سه لایه تقریباً مساوی (هر یک حدود ۱۰۰ میلی‌متر) ریخته می‌شود. هر لایه پس از ریختن، با استفاده از میله کوبش، ۲۵ بار متراکم می‌شود تا از حذف حفره‌های هوا اطمینان حاصل شود. پس از پر شدن لایه سوم و متراکم‌سازی آن، قالب مخروطی پس از گذشت تقریباً ۱۰ ثانیه به‌آرامی و بدون تکان از بتن جدا می‌شود. افت ارتفاع بتن تازه نسبت به ارتفاع اولیه به‌عنوان مقدار اسلامپ اندازه‌گیری و ثبت می‌شود [۴۳]. فرآیند آزمون در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶. نمونه‌ای از انجام آزمایش اسلامپ بر روی یکی از بتن‌های شاهد [۱۸].

۲.۳.۲. آزمایش بتن سخت شده

آزمایش بتن سخت‌شده، یکی از مهم‌ترین مراحل در ارزیابی عملکرد مکانیکی بتن است و به‌طور مستقیم با کیفیت، دوام و ایمنی سازه‌های بتنی در ارتباط است. در این پژوهش، دو آزمون مقاومت فشاری و برشی مستقیم با هدف بررسی و مقایسه تأثیر ترکیب هم‌زمان الیاف پلی‌پروپیلن و رزین اکریلیک بر خواص مکانیکی بتن، به‌ویژه در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، انجام شد. جهت ارزیابی خواص مکانیکی بتن سخت‌شده، دو آزمون مقاومت فشاری و مقاومت برشی مستقیم بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر انجام شد. آزمون مقاومت فشاری مطابق با استانداردهای ASTM C109/C109M و BS EN 12390-3 طراحی شد. نمونه‌ها در سه لایه در قالب‌های فلزی ریخته شده و با میله فولادی متراکم شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت و خارج‌سازی از قالب، نمونه‌ها به‌مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در محلول آب آهک با دمای ۲±۲۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند [۴۴, ۴۵]. هدف از عمل‌آوری مرطوب، تکمیل واکنش‌های هیدراسیون و ارتقاء خواص فیزیکی و مکانیکی بتن است [۲۹, ۴۶]. پس از پایان دوره عمل‌آوری، آزمون فشاری با دستگاه یونیورسال تحت سرعت بارگذاری حدود ۰.۵ تا ۰.۸ مگاپاسکال بر ثانیه اجرا شد. مقاومت فشاری (fc) از رابطه زیر به‌دست آمد.

رابطه ۱:
$$f_c = \frac{P}{A}$$

که در آن، fc مقاومت فشاری (MPa)، P حداکثر نیروی شکست (N) و A سطح بارگذاری مقطع نمونه (mm^2) [۳۱]. برای ارزیابی مقاومت برشی، از روش برش مستقیم استفاده شد که از جمله روش‌های رایج برای سنجش مقاومت پیوستگی و ارزیابی عملکرد ناحیه انتقالی (ITZ) در بتن‌های چندمرحله‌ای محسوب می‌شود [۳۳]. قالب آزمون برش به‌صورت یک جفت فک فولادی طراحی و ساخته شد که نمونه درون آن قرار گرفته و تحت بار فشاری دستگاه یونیورسال، تنش برشی مستقیم را دریافت می‌کرد. فک‌ها از فولاد آلیاژی MO40 معادل AISI 4140 یا DIN 42CrMo4 ساخته شدند که به‌دلیل استحکام بالا، مقاومت در برابر تنش‌های پیچشی و ضربه‌ای و قابلیت ماشین‌کاری مناسب، انتخاب شده‌اند. این فولاد از خانواده فولادهای عملیات حرارتی‌پذیر بوده و به‌طور گسترده در قطعات صنعتی مانند شافت‌ها، چرخ‌دنده‌ها و قالب‌های تحت تنش استفاده می‌شود [۴۷, ۴۸].

مقاومت برشی از رابطه زیر به‌دست آمد:

رابطه ۲:
$$\sigma_v = \frac{F_v}{A_v}$$

که در آن F_v حداکثر نیروی برشی (N) و A_v سطح مقطع برش‌خورده نمونه (cm^2) است. آزمون برش مطابق با اصول ارائه‌شده در استاندارد ASTM C882 و EN 12615:2004 انجام گرفت [۴۹, ۵۰].

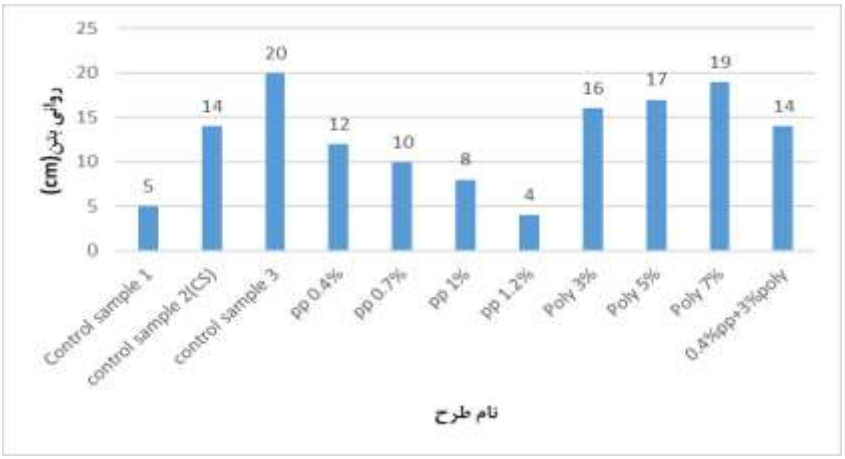


شکل ۷. تصویری از نحوه‌ی انجام آزمایش مقاومت فشاری و برشی از راست به چپ.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. آزمایش بتن تازه

همانطور که در شکل ۸ ارائه‌شده است، تغییرات اسلامپ بتن تازه را در طرح‌های مختلف اختلاط شامل نمونه‌های کنترل، طرح‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن(PP) ، رزین پلیمری و ترکیب همزمان آن‌ها نشان می‌دهد. ابتدا در سه نمونه‌ی کنترل، با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴ به ۰/۵ و سپس ۰/۵۵، روانی بتن از مقدار کم به بیشینه افزایش یافته است که بیانگر ارتباط مستقیم میان میزان آب و کارایی بتن است.



شکل ۸. مقایسه اسلامپ نمونه‌ها

در نمونه‌های حاوی الیافPP با w/c ثابت ۰/۵، افزایش تدریجی درصد الیاف از ۰/۴٪ تا ۱/۲٪ باعث کاهش پیوسته اسلامپ شده، به‌طوری‌که از روانی اولیه ۱۴ سانتی‌متر در CS به ۴ سانتی‌متر در بیشترین مقدار الیاف رسیده است. این کاهش ناشی از جذب آب بیشتر و افزایش اصطکاک داخلی به دلیل حضور الیاف است. در مقابل، افزایش درصد رزین پلیمری در محدوده ۳٪ تا ۷٪، سبب بهبود روانی از ۱۴ به ۱۹ سانتی‌متر شده است. پلیمریزه شدن و بهبود توزیع آب در مخلوط از دلایل این افزایش کارایی هستند. در طرح ترکیبی حاوی ۰/۴٪ PP و ۳٪ پلیمر، روانی برابر با نمونه شاهد (۱۴ سانتی‌متر) به‌دست آمده که نشان می‌دهد تأثیر منفی الیاف بر کارایی، با افزودن پلیمر به‌خوبی جبران شده و تعادل مناسبی میان روانی و سایر خواص حاصل شده است [۵۱, ۵۲].

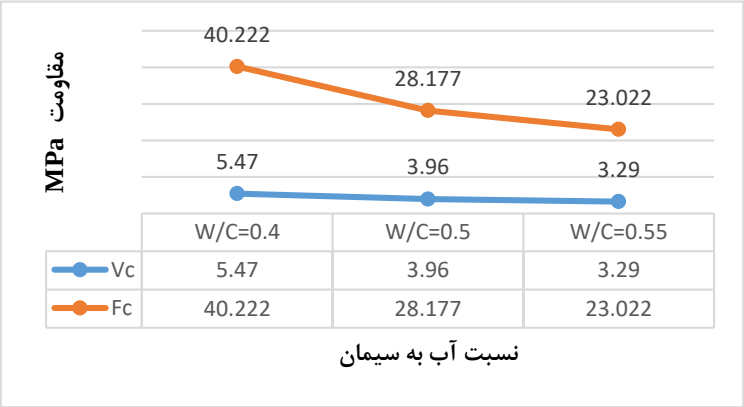
۳.۲. آزمایش بتن سخت شده

در این پژوهش، به‌منظور بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان، درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن، پلیمر و ترکیب همزمان آن‌ها بر عملکرد مکانیکی بتن، آزمون مقاومت برشی و مقاومت فشاری انجام شد. نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر تهیه گردیده و پس از عمل‌آوری در شرایط اشباع، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. انجام این آزمایش در بازه‌های زمانی مختلف، امکان تحلیل روند رشد مقاومت فشاری و ارزیابی تأثیر پایدار افزودنی‌ها بر خواص بتن سخت‌شده را فراهم نمود.

۳.۲.۱. تاثیر نسبت آب به سیمان

بررسی نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان، هر دو مقاومت برشی و مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است. این موضوع با اصول مکانیک بتن و رفتار خمیر سیمان کاملاً هم‌خوانی دارد. در نسبت آب به سیمان ۰.۴۰، بتن دارای بیشترین چگالی و کمترین فضای خالی در ساختار خمیر سیمان است. در نتیجه، پیوستگی بین اجزای سازنده بیشتر بوده و هم مقاومت فشاری (۴۰.۲۲۲ MPa) و هم مقاومت برشی (۵.۴۷ MPa) در بالاترین مقدار خود قرار

دارند. با افزایش نسبت آب به سیمان به ۰.۵۰، میزان آب اضافی باعث کاهش چسبندگی بین ذرات و افزایش تخلخل در ساختار بتن شده است. این موضوع منجر به افت مقاومت فشاری تا (۲۸.۱۷۷ MPa) و مقاومت برشی تا (۳.۹۶ MPa) شده است. در نسبت ۰.۵۵، افت بیشتری مشاهده می‌شود به‌طوری‌که مقاومت فشاری به (۲۳.۰۲۲ Mpa) و مقاومت برشی به(۳.۲۹ Mpa) کاهش یافته است. و میتوان اینگونه استنباط کرد که با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰.۴ به ۰.۵۵ مقاومت فشاری و برشی به ترتیب ۴۲.۸ و ۳۹.۸ درصد کاهش یافته است. افزایش نسبت آب به سیمان در بتن معمولی باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری و برشی می‌شود. به همین دلیل، کنترل دقیق نسبت آب به سیمان در فرآیند طراحی مخلوط بتن، یکی از عوامل کلیدی در تضمین عملکرد مکانیکی مناسب بتن در سنین مختلف به‌ویژه سن ۲۸ روزگی است [۲۶].



شکل ۹. مقایسه مقاومت برشی و فشاری نمونه های بتن معمولی

۳.۲.۲. نقش حضور الیاف pp

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن در سن ۲۸ روزگی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت‌های فشاری و برشی دارد.



شکل ۱۰. مقایسه مقاومت برشی و فشاری نمونه های بتن حاوی الیاف pp

نمونه شاهد با نسبت آب به سیمان ۰.۵ مقاومت فشاری حدود ۲۸.۱۸ مگاپاسکال و مقاومت برشی ۳.۹۶ مگاپاسکال داشت. با افزایش مقدار الیاف تا ۰.۲٪، مقاومت فشاری بیش از ۲۳٪ و مقاومت برشی بیش از ۲۰٪ افزایش یافت. بیشترین مقاومت فشاری در ۰.۴٪ الیاف مشاهده شد که حدود ۲۶.۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داشت، در حالی که مقاومت برشی نسبت به ۰.۲٪ الیاف کمی کاهش یافت اما همچنان از نمونه شاهد بالاتر بود. افزایش بیشتر الیاف تا ۰.۷٪ منجر به کاهش مقاومت فشاری به سطح نمونه شاهد شد، اما مقاومت برشی به بیشترین مقدار خود رسید که نشان‌دهنده بهبود رفتار پس

از ترک‌خوردگی است. درصدهای بالاتر از ۰.۷٪ بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری ایجاد نکرد و مقاومت برشی در حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد بالاتر از نمونه شاهد باقی ماند. همچنین، کاهش نسبت آب به سیمان از ۰.۵ به ۰.۴ باعث افزایش قابل توجه مقاومت‌های فشاری و برشی شد. نتایج کلی نشان می‌دهد که محدوده بهینه الیاف پلی‌پروپیلن برای بهبود همزمان مقاومت فشاری و برشی بتن بین ۰.۲ تا ۰.۴ درصد است و افزودن بیش از حد الیاف می‌تواند کارایی بتن را کاهش دهد [۲۰, ۵۳].

۳ .۲. ۳. نقش حضور پلیمر

مطابق شکل ۱۱ نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های بتن حاوی رزین اکریلیک در سن ۲۸ روزگی نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه مقاومت‌های فشاری و برشی با افزایش درصد پلیمر است. این مطالعه به بررسی نمونه‌های حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد رزین اکریلیک (بر حسب وزن سیمان) در مقایسه با نمونه شاهد (با نسبت آب به سیمان ۰/۵) پرداخته است.



شکل ۱۱- مقایسه مقاومت برشی و فشاری نمونه های بتن حاوی پلیمر

بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که: مقاومت فشاری نمونه شاهد (۲۸/۱۸ مگاپاسکال) با افزودن ۳٪ پلیمر به ۲۴/۶۲ مگاپاسکال (کاهش ۱۲/۶٪)، با ۵٪ پلیمر به ۱۸/۲۷ مگاپاسکال (کاهش ۳۵/۲٪) و با ۷٪ پلیمر به ۱۱/۷۸ مگاپاسکال (کاهش ۵۸/۲٪) رسیده است. مقاومت برشی نیز از ۳/۹۶ مگاپاسکال در نمونه شاهد به ترتیب به ۳/۷۸ (کاهش ۴/۵٪)، ۲/۸۰ (کاهش ۲۹/۳٪) و ۲/۲۷ مگاپاسکال (کاهش ۴۲/۷٪) کاهش یافته است. مکانیزم این کاهش مقاومت را می‌توان به سه عامل اصلی نسبت داد: ۱. اختلال در فرآیند هیدراتاسیون سیمان ناشی از تشکیل لایه پلیمری حول ذرات سیمان [۵۴]. ۲. افزایش تخلخل ماتریس بتن در اثر خشک شدن پلیمر و ایجاد حفره‌های مویینه ۳. جایگزینی پیوندهای سیلیکاتی مستحکم با ساختار پلیمری ضعیف‌تر . این یافته‌ها با تحقیقات پیشین در زمینه بتن‌های پلیمری همخوانی دارد که نشان می‌دهند افزودن پلیمرهای آلی بیش از ۳٪ وزن سیمان می‌تواند تا ۵۰٪ مقاومت فشاری را کاهش دهد [۵۵, ۵۶]. با این حال، باید توجه داشت که اگرچه پلیمرها ممکن است مقاومت اولیه را کاهش دهند، اما می‌توانند مزایای دیگری مانند بهبود چقرمگی، افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون‌های مخرب و ارتقای رفتار پس از ترک‌خوردگی را به همراه داشته باشند [۵۷, ۵۸].

۳ .۲. ۴. نقش حضور همزمان پلیمر و الیاف

بر اساس نتایج آزمایش‌های بتن در سن ۲۸ روز مطابق آنچه در شکل ۱۲ نشان داده شده است؛ افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن (PP) مقاومت فشاری را از ۲۸.۱۸ به ۳۵.۶۹ مگاپاسکال (افزایش ۲۶.۶٪) و مقاومت برشی را از ۳.۹۶ به ۵.۶۴ مگاپاسکال (افزایش ۴۲.۴٪) بهبود می‌بخشد. در مقابل، افزودن ۳٪ رزین اکریلیک به تنهایی باعث کاهش مقاومت فشاری

به ۲۴.۶۲ مگاپاسکال (کاهش ۱۲.۶٪) و مقاومت برشی به ۳.۷۸ مگاپاسکال (کاهش ۴.۵٪) می‌شود. ترکیب همزمان این دو افزودنی (۳٪ پلیمر + ۰.۴٪ PP) نتایج میانی با مقاومت فشاری ۳۱.۷۸ مگاپاسکال (۱۲.۸٪ افزایش نسبت به شاهد) و مقاومت برشی ۴.۴۷ مگاپاسکال (۱۲.۹٪ افزایش) ارائه می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن از طریق کنترل ترک‌ها و بهبود انتقال تنش، خواص مکانیکی را افزایش می‌دهند، در حالی که رزین اکریلیک به دلیل اختلال در هیدراتاسیون سیمان ممکن است مقاومت را کاهش دهد. با این حال، ترکیب این دو ماده می‌تواند راهکاری برای دستیابی به تعادل بین مقاومت و سایر ویژگی‌های مطلوب مانند دوام باشد. مطالعات نشان می‌دهند که الیاف می‌توانند اثرات منفی پلیمر بر مقاومت را تا حدی جبران کنند، در حالی که پلیمر نیز می‌تواند چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی را بهبود بخشد [۵۶, ۵۷, ۵۹, ۶۰]. برای دستیابی به نتایج بهینه، بررسی درصدهای مختلف این ترکیبات در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت برشی و فشاری نمونه های بتن حاوی پلیمر

۳.۳. تعیین رابطه بین مقاومت برشی و فشاری

تحلیل داده‌های نمودار شکل ۱۲، یک رابطه نمایی (Exponential) بین نسبت آب به سیمان (w/c) و مقاومت فشاری (Fc)و برشی (Vc) قابل محاسبه است. با استفاده از رگرسیون غیرخطی، معادله زیر محاسبه شده است: رابطه مقاومت فشاری (Fc) و مقاومت برشی (Vc):

رابطه ۳: $V_c=0.136\times F_c^{1.02}$ $(R^2=0.998)$

کاهش w/c از ۰.۵ به ۰.۴، مقاومت فشاری را ۴۲.۷٪ و مقاومت برشی را ۳۸.۱٪ افزایش می‌دهد. نتایج با قانون آبرامز (Abrams' law) همخوانی دارد که بیان می‌کند مقاومت بتن با افزایش w/c به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد[۶۱].

با بررسی و تحلیل داده های نمودار شکل ۱۳ نیز خواهیم داشت:

رابطه ۴: $Vc=0.14F_c+0.05F_c^{1.5}$ $(R2=0.98)$

این رابطه غیرخطی نشان می‌دهد که افزایش Fc با شیب بیشتری نسبت به Vc همراه است. بهینه‌ترین درصد الیاف: بین ۰.۴٪ تا ۰.۷٪ (حداکثر مقاومت در این محدوده) مشخص گردید و اثر بیش‌ازحد استفاده از الیاف (بیش از ۰.۷٪) با کاهش ۲۱٪ مقاومت فشاری نسبت به نقطه اوج و کاهش ۹٪ مقاومت برشی نسبت به نقطه اوج را نشان می‌دهد.

تحلیل داده های نمودار شکل ۱۴ نیز خواهیم داشت:

رابطه ۵: $Vc=0.134F_c+0.0021F_c^{2}$ $(R2=0.999)$

نرخ کاهش مقاومت فشاری: ۱۲.۶٪ (۳٪ پلیمر)، ۳۵.۲٪ (۵٪ پلیمر)، ۵۸.۲٪ (۷٪ پلیمر) مشخص شد و کاهش مقاومت برشی: ۴.۵٪ (۳٪ پلیمر)، ۲۹.۳٪ (۵٪ پلیمر)، ۴۲.۷٪ (۷٪ پلیمر) از رابطه ۵ استنباط شد. مقاومت فشاری ۳۷٪ حساستر از مقاومت برشی نسبت به افزایش پلیمر در نمونه های از خود نشان داد [۶۲-۶۴].

۴. نتیجه‌گیری

بررسی حاضر به‌طور جامع تأثیر نسبت آب به سیمان، حضور الیاف پلی‌پروپیلن، پلیمر اکریلیک و ترکیب همزمان این افزودنی‌ها را بر خواص بتن تازه و سخت‌شده مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ نشان داد که افزایش نسبت آب به سیمان و استفاده از رزین‌های پلیمری موجب بهبود کارایی و روانی بتن تازه می‌شود؛ در حالی‌که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش اسلامپ به دلیل افزایش اصطکاک داخلی و جذب آب می‌گردد. با این حال، استفاده همزمان از پلیمر و الیاف می‌تواند تعادل مناسبی بین کارایی و قوام بتن فراهم کند. در بررسی مقاومت‌های مکانیکی بتن سخت‌شده، کاهش نسبت آب به سیمان از ۰.۵۵ به ۰.۴۰ به افزایش چشمگیر مقاومت‌های فشاری و برشی انجامید و این موضوع بر اهمیت کنترل دقیق w/c در طراحی مخلوط تأکید دارد. افزودن الیاف PP تا حدود ۰.۴٪ باعث بهبود قابل‌ملاحظه در مقاومت‌های فشاری (تا ۲۶.۶٪) و برشی (تا ۲۰.۷٪) شد، اما مقادیر بالاتر منجر به کاهش کارایی و افت مقاومت فشاری گردید. در مقابل، افزودن پلیمر به بتن با کاهش تدریجی مقاومت‌ها همراه بود که به اختلال در هیدراتاسیون، افزایش تخلخل و جایگزینی پیوندهای ضعیف‌تر نسبت داده شد. با این حال، ترکیب همزمان ۰.۴٪ الیاف و ۳٪ پلیمر، عملکرد مکانیکی مناسبی ارائه داد که نشان‌دهنده هم‌پوشانی مثبت این دو افزودنی در بهبود رفتار بتن است. مدل‌سازی روابط بین مقاومت فشاری و برشی در سن ۲۸ روز با دقت بالا (R^2>0.98) صحت روندهای مشاهده شده را تأیید کرد. همچنین، این تحلیل‌ها نشان دادند که مقاومت فشاری حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای مورد بررسی دارد، به‌ویژه در برابر درصد پلیمر. همچنین مشاهده شد که افزودن هم‌زمان الیاف و پلیمر، تمایل بتن به ترک‌خوردگی پلاستیک و ترک‌های انقباضی اولیه را کاهش داده و رفتار شکننده بتن را به رفتاری نسبتاً نرم‌تر و چقرمه‌تر تبدیل می‌کند. در زمینه‌ی کنترل ترک، حضور الیاف توانست به شکل مؤثری مسیر رشد ترک‌ها را منحرف کرده و گسترش آن‌ها را محدود نماید که این مسئله در بهبود دوام درازمدت بسیار مؤثر خواهد بود. بررسی افت اسلامپ در نمونه‌های دارای بیش از ۰.۶٪ الیاف نیز گویای آن است که در صورت عدم استفاده همزمان از روان‌کننده یا پلیمر، کارایی بتن به‌شدت کاهش خواهد یافت. به لحاظ اجرایی، پیشنهاد می‌شود که نسبت بهینه ۰.۴٪ الیاف و ۲٪ تا ۳٪ پلیمر در کنار نسبت آب به سیمان ۰.۴۰ برای دستیابی به تعادل مناسب بین کارایی، مقاومت و دوام انتخاب گردد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده کنترل‌شده و بهینه از الیاف و پلیمرها می‌تواند ضمن حفظ کارایی بتن تازه، به بهبود خواص مکانیکی و عملکرد بتن سخت‌شده منجر شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، اثرات بلندمدت و دوام بتن‌های اصلاح‌شده با این افزودنی‌ها تحت شرایط محیطی مختلف نیز بررسی شود. در نهایت، با توجه به مزایای مشخص‌شده، می‌توان ترکیب این افزودنی‌ها را در کاربردهای سازه‌ای خاص نظیر کف‌سازی‌های صنعتی، تونل‌ها و اجزای پیش‌ساخته مورد بررسی و استفاده قرار داد.

۵.قدردانی

در اینجا لازم است از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گنبد کاووس و همچنین مسئول آزمایشگاه بتن آقای مهندس بیک‌زاده تقدیر و تشکر داریم.

۶. مراجع

1. Ahmed, T.W., et al., *Properties and performance of polypropylene fiber-reinforced concrete: A review.* Ain Shams Engineering Journal, 2020. **11**(4): p. 1097-1107.
2. Karamzadeh, N.S., H.r. Karimi, and E. Khedri, *An investigation on the application of acrylic resin agent for fiber/matrix bond strengthening in green engineered cementitious composites (ECC).* Case Studies in Construction Materials, 2024. **20**: p. e03355.
3. Lakshmi, A., et al., *A Review on Efficiency of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete*, in *Sustainability Trends and Challenges in Civil Engineering*, L. Nandagiri and M.C. Narasimhan, Editors. 2022, Springer Singapore. p. 581-591.
4. Del Savio, F.A., G.S. Melo, and V.A. Del Savio, *Post-Cracking Properties of Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers through the Barcelona Test.* Polymers, 2023. **15**(18): p. 3718.
5. Tripathi, B., *Effects of Polymers on Cement Hydration and Properties of Concrete: A Review.* ACS Omega, 2024. **9**(2): p. 2014-2021.
6. Chen, J., et al., *An Experimental Study of Shear Resistance for Multisize Polypropylene Fiber Concrete Beams.* ResearchGate (Preprint/Conference Paper), 2021.
7. Lakshmi, A.P., et al., *A Review on Efficiency of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete*, in *Sustainability Trends and Challenges in Civil Engineering*, L. Nandagiri and M.C. Narasimhan, Editors. 2022, Springer Singapore. p. 581-591.
8. Chen, Y., et al., *Performance evaluation of indented macro synthetic polypropylene fibers in high strength self-compacting concrete (SCC).* Scientific Reports, 2024. **14**: p. 20844.
9. Hsu, Y.S. and C.Y. Lin, *Polypropylene fiber reinforced concrete improved by using silica fume and acrylic emulsion polymer.* ResearchGate (Preprint/Conference Paper), 2022.
10. Gan, Y., et al., *State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete.* Journal of Composites Science, 2021. **5**(2): p. 59.
11. Yuan, Y. and J. Jia, *Review on the Durability of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete.* Advances in Civil Engineering, 2021. **2021**: p. 8883606.
12. Beeldens, A., et al., *From microstructure to macrostructure: an integrated model of structure formation in polymer-modified concrete.* Materials and Structures, 2005. **38**: p. 601

E.

13. Roshani, E., M. Mousivand, and M. Bayatb, *Enhancing mechanical properties of concrete using polymer-modified recycled carpet fiber composites.* Construction and Building Materials, 2020. **245**: p. 118444.
14. Kich, R.d.M., V.A. Kich, and K.I. Seibt, *Practical Analysis of Permeable Concrete Properties with Polypropylene Fiber Addition.* arXiv, 2022. **physics.app-ph**.
15. Das, S., I. Singh, and B. Singh, *Autonomous Repair in Cementitous Material by Combination of Superabsorbent Polymers and Polypropylene Fibres: A Step Towards Sustainable Infrastructure.* arXiv, 2017. **physics.app-ph**.
16. Gan, Y., et al., *Review of Component Materials and Diverse Applications of Polymer Concrete.* Materials, 2024. **18**(12): p. 2745.

17. Faramarzi.M , Mousivand.M., Seyyedi A,, *Investigation of the Effects of Polymer on the Compressive Strength of Fiber-Reinforced Concrete*, in *5th International Conference on Seismic Strengthening and the International Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning*. 2025, Conference Organizing Committee: Tabriz, Iran.
18. Faramarzi.M , Mousivand.M., *Investigating the Effects of Polymer on Shear Behavior of Fiber-Reinforced Concrete*, in *5th International Conference on Seismic Strengthening and the International Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning*. 2025, University of Tabriz: Tabriz.
19. Zhu, Y., et al., *Fracture characteristics and microscopic mechanism of slag-based marine geopolymer mortar prepared with seawater and sea-sand.* Construction and Building Materials.
20. Bentur, A. and S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2006: CRC Press.
21. Yao, W., Z. Li, and K. Wu, *Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction.* Cement and Concrete Research, 2003. **33**: p. 27-30.
22. Li, V.C., *On engineered cementitious composites (ECC).* Journal of Advanced Concrete Technology, 2003. **1**(3): p. 215-230.
23. Li, J., et al., *Interface Performance of Rapid Repair Concrete Reinforced with Polypropylene Fiber and Styrene-Butadiene Rubber Emulsion.* Materials, 2021. **14**(17): p. 5035.
24. Ramezanianpour, A.A., H.B. Jovein, and M. Kamyab, *Influence of polypropylene fibers on permeability, strength, and fracture properties of concrete.* Construction and Building Materials, 2013. **28**(1): p. 571-578.
25. Aydın, A.C., *Self compactability of high volume mineral admixture concrete for sustainable construction.* Energy and Buildings, 2007. **39**(2): p. 202-207.
26. Neville, A.M., *Properties of Concrete*. 2011: Pearson Education Limited.
27. Taylor, H.F.W., *Cement Chemistry*. 2 ed. 1997, London: Thomas Telford Publishing.
28. Mehta, P.K. and P.J.M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4 ed. 2014: McGraw-Hill Education.
29. Mindess, S., J.F. Young, and D. Darwin, *Concrete*. 2nd ed. 2003: Prentice Hall.
30. ACI Committee, *Guide to Durable Concrete*. 2016, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
31. Aïtcin, P.C., *High-Performance Concrete*. 2000, London: E & FN Spon (an imprint of Routledge).
32. Portland Cement, A., *Design and Control of Concrete Mixtures*. 17 ed. 2020, Skokie, IL: Portland Cement Association.
33. Institute of, S. and I. Industrial Research of, *Iranian National Standard for Portland Cement Type II.* ISIRI 389, 2021.
34. ASTM C136 / C136M-19, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.* ASTM C136 / C136M-19, 2019.
35. ASTM D422-63(2007), *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.* ASTM D422-63(2007), 2007.
36. ASTM C33 / C33M-18, *Standard Specification for Concrete Aggregates.* ASTM C33 / C33M-18, 2018.

37. Institute of, S. and I. Industrial Research of, *Standard Guide for Sampling of Aggregates.* ISIRI 4977, 2021.
38. Mostoufi Nejad, D., *Concrete Technology and Mix Design*. 2 ed. 2015, Tehran: Arkan Danesh.
39. ASTM C1059/C1059M-21, *Standard Specification for Latex Agents for Bonding Fresh to Hardened Concrete.* ASTM C1059/C1059M-21, 2021.
40. ASTM C1042-99, *Standard Test Method for Bond Strength of Latex Systems Used with Concrete by Slant Shear.* ASTM C1042-99, 1999.
41. ASTM C1440-08(2013), *Standard Specification for Thermoplastic Elastomeric (TPE) Gasket Materials for DWV, Sewer, Sanitary, and Storm Plumbing Systems.* ASTM C1440-08(2013), 2013.
42. Faramarzi, M.M., M.,, *Investigating the Effects of Polymer on Shear Behavior of Fiber-Reinforced Concrete*, in *The 5th International Conference on Seismic Retrofitting and the International Conference on Modern Technologies in Civil Engineering and Architecture*. 2025, University of Tabriz: Tabriz, Iran.
43. ASTM C143/C143M-20, *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C143/C143M-20).* 2020.
44. ASTM C109/C109M-20, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.* ASTM C109/C109M-20, 2020.
45. British Standards, I., *Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.* BS EN 12390-3:2019, 2019.
46. Bentz, D.P. and et al., *Influence of curing on hydration and strength development.* Cement and Concrete Research, 2011. **41**(8): p. 947-953.
47. Khan, W.A., et al., *Comparative Assessment of Mechanical Properties and Fatigue Life of Conventional and Multistep Rolled Forged Connecting Rods of High Strength AISI/SAE 4140 Steel.* Metals, 2023. **13**: p. 1035.
48. Brnić, J., et al., *Study of the Effects of High Temperatures on the Engineering Properties of Steel 42CrMo4.* High Temperature Materials and Processes, 2014. **34**(1): p. 5-10.
49. Astm C882/C882M, *C882/C882M-13a; Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used with Concrete by Slant Shear.* ASTM Standard, 2013.
50. European Committee for, S., *Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of shear adhesion — Long-term.* 2004.
51. Faridz, M.Z., *Effect of polypropylene fibre towards normal concrete physical and strength properties.* International Journal of Civil Engineering and Technology, 2021. **12**(4): p. 123-130.
52. Yaqin, C., et al., *Performance evaluation of indented macro synthetic polypropylene fibers in high-strength self-compacting concrete (SCC).* Scientific Reports, 2024. **14**: p. 20844.
53. Kanda, T. and V.C. Li, *Tensile behavior of fiber reinforced cementitious composites with high volume fraction of short fibers.* Journal of Advanced Concrete Technology, 1999. **1**(3): p. 241-252.
54. Ohama, Y., *Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology*. 1995: William Andrew.

55. Li, X., F. Chen, and M. Zhang, *Mechanical performance of polymer-modified fiber reinforced concrete under shear loading.* Journal of Materials in Civil Engineering, 2023. **35**(3): p. 04022345.
56. Silva, D.A. and et al., *Effect of polymer addition on mechanical properties of cement mortars.* Materials Research, 2010. **13**(3): p. 369-374.
57. Ohama, Y., *Polymer-based admixtures.* Cement and Concrete Composites, 1998. **20**(2–3): p. 189-212.
58. 548.4R, A., *Guide for the Use of Polymers in Concrete*. 2020, American Concrete Institute.
59. ACI Committee 544, *Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.3R-08)*. 2009, American Concrete Institute.
60. Alhozaimy, A.M. and et al., *Effect of polypropylene fiber and polymer on concrete properties.* Construction and Building Materials, 2014. **66**: p. 565-573.
61. Abrams, D.A., *Design of Concrete Mixtures*. Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory. 1918: Lewis Institute.
62. American Concrete, I., *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. ACI 318-19. 2019, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
63. American Concrete, I., *Report on Fiber Reinforced Concrete*, in *ACI 544.1R-96*. 2016, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.
64. Banthia, N., *Fiber Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications*, in *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, Z.S.P.D. Yu, Editor. 2009, Springer: Dordrecht. p. 37-52.